



全国高等院校新能源专业规划教材

全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材

光伏发电实验实训教程

Practical Training Course of Photovoltaic Power

主 编 李 涛

副主编 梁文英 梁光胜 司 杨



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



全国高等院校新能源专业规划教材

全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材

光伏发电实验实训教程

Practical Training Course of Photovoltaic Power

主 编 李 涛

副主编 梁文英 梁光胜 司 杨



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是“全国高等院校新能源专业规划教材”之一。主要针对太阳能光伏发电实践教学。主要内容包括太阳电池材料实验、太阳电池实验、光伏组件实验、光伏电力电子实验、储能电池实验、光伏发电系统实验和智能微电网实验等7个部分。本书以“工程思维训练”为主线，将与太阳能光伏发电工程相关的专业知识进行系统整合，从工程实践角度科学呈现相关学科知识体系。

本书可作为新能源科学与工程本科专业本科学生的专业主干课程教材。

图书在版编目（C I P）数据

光伏发电实验实训教程 / 李涛主编. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2018. 6
全国高等院校新能源专业规划教材 全国普通高等教育
新能源类“十三五”精品规划教材
ISBN 978-7-5170-6595-1

I. ①光… II. ①李… III. ①太阳能发电—实验—高等学校—教材 IV. ①TM615-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第147742号

书 名	全国高 院校新能源专业规划教材 全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材 光伏发电实验实训教程 GUANGFU FADIAN SHIYAN SHIXUN JIAOCHENG
作 者	主 编 李 涛 副主编 梁文英 梁光胜 司 杨
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15印张 356千字
版 次	2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	49.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

丛书编委会

顾问 褚君浩 (中国科学院上海技术物理研究所)

徐建中 (中国科学院工程热物理研究所)

贺德馨 (中国风能协会)

刘吉臻 (华北电力大学)

杨德仁 (浙江大学)

张百良 (河南农业大学)

主任 杨勇平 (华北电力大学)

副主任 戴松元 (华北电力大学)

陈汉平 (华中科技大学)

黄志高 (福建师范大学)

汪建文 (内蒙古工业大学)

委员 (按姓氏笔画排序)

王 谦 (江苏大学)

王少清 (济南大学)

王景甫 (北京工业大学)

田 德 (华北电力大学)

邢作霞 (沈阳工业大学)

许 昌 (河海大学)

孙后环 (南京工业大学)

李 岩 (东北农业大学)

李 涛 (青海师范大学)

杨 晨 (重庆大学)

杨世关 (华北电力大学)

陈 荐 (长沙理工大学)

林 鹿 (厦门大学)

周建斌 (南京林业大学)

周继承 (中南大学)

钱 斌 (常熟理工学院)

本书编委会

主 编 李 涛（青海师范大学）

副 主 编 梁文英（青海师范大学）

梁光胜（北京海瑞克科技发展有限公司）

司 杨（青海大学）

参 编 袁 娇（青海师范大学）

马先果（贵州理工学院）

唐安江（贵州理工学院）

李邦兴（重庆理工大学）

吴 江（中国人民解放军陆军勤务学院）

宋经纬（乐山职业技术学院）

刘文富（黄淮学院）

王银玲（黄淮学院）

王康民（山西能源学院）

武仁兵（北京海瑞克科技发展有限公司）

刘 剑（唐山学院）

丛 书 前 言

总算不负大家几年来的辛苦付出，终于到了该为这套教材写篇短序的时候了。

这套全国高等院校新能源专业规划教材、全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材建设的缘起，要追溯到 2009 年我国启动的国家战略性新兴产业发展计划，当时国家提出了要大力发展包括新能源在内的七大战略性新兴产业。经过不到十年的发展，我国新能源产业实现了重大跨越，成为全球新能源产业的领跑者。2016 年国务院印发的《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，提出要把战略性新兴产业摆在经济社会发展更加突出的位置，强调要大幅提升新能源的应用比例，推动新能源成为支柱产业。

产业的飞速发展导致人才需求量的急剧增加。根据联合国环境规划署 2008 年发布的《绿色工作：在低碳、可持续发展的世界实现体面劳动》，2006 年全球新能源产业提供的工作岗位超过 230 万个，而根据国际可再生能源署发布的报告，2017 年仅我国可再生能源产业提供的就业岗位就达到了 388 万个。

为配合国家战略，2010 年教育部首次在高校设置国家战略性新兴产业相关专业，并批准华北电力大学、华中科技大学和中南大学等 11 所高校开设“新能源科学与工程”专业，截至 2017 年，全国开设该专业的高校已超过 100 所。

上述背景决定了新能源专业的建设无法复制传统的专业建设模式，在专业建设初期，面临着既缺乏参照又缺少支撑的局面。面对这种挑战，2013 年华北电力大学力邀多所开设该专业的高校，召开了一次专业建设研讨会，共商如何推进专业建设。以此次会议为契机，40 余所高校联合成立了“全国新能源科学与工程专业联盟”（简称联盟），联盟成立后发展迅速，目前已有近百所高校加入。

联盟成立后将教材建设列为头等大事，2015 年联盟在华北电力大学召开了首次教材建设研讨会。会议确定了教材建设总的指导思想：全面贯彻党的教育方针和科教兴国战略，广泛吸收新能源科学研究和教学改革的最新成果，认真对标中国工程教育专业认证标准，使人才培养更好地适应国家战略性新兴产业的发展需要。同时，提出了“专业共性课+方向特色课”的新能源专业课程体系建设思路，并由此确定了教材建设两步走的计划：第一步以建设新能源各个专业方向通用的共性课程教材为核心；第二步以建设专业方向特色课程教材为重点。此次会议还确定了第一批拟建设的教材及主编。同时，通过专家投票的方式，选定中国水利水电出版社作为教材建设的合作出版机构。在这次会议的基础上，联盟又于 2016 年在北京工业大学召开了教材建设推进会，讨论和审定了各部教材的编写大纲，确定了编写任务分工，由此教材正式进入编写阶段。

按照上述指导思想和建设思路，首批组织出版 9 部教材：面向大一学生编写了《新能源科学与工程专业导论》，以帮助学生建立对专业的整体认知，并激发他们的专业学习兴

趣；围绕太阳能、风能和生物质能3大新能源产业，以能量转换为核心，分别编写了《太阳能转换原理与技术》《风能转换原理与技术》《生物质能转化原理与技术》；鉴于储能技术在新能源发展过程中的重要作用，编写了《储能原理与技术》；按照工程专业认证标准对本科毕业生提出的“理解并掌握工程管理原理与经济决策方法”以及“能够理解和评价针对复杂工程问题的工程实践对环境、社会可持续发展的影响”两项要求，分别编写了《新能源技术经济学》《能源与环境》；根据实践能力培养需要，编写了《光伏发电实验实训教程》《智能微电网技术与实验系统》。

首批9部教材的出版，只是这套系列教材建设迈出的第一步。在教育信息化和“新工科”建设背景下，教材建设必须突破单纯依赖纸媒教材的局面，所以，联盟将在这套纸媒教材建设的基础上，充分利用互联网，继续实施数字化教学资源建设，并为此搭建了两个数字教学资源平台：新能源教学资源网（<http://www.creeu.org>）和新能源发电内容服务平台（<http://www.yn931.com>）。

在我国高等教育进入新时代的大背景下，联盟将紧跟国家能源战略需求，坚持立德树人的根本使命，继续探索多学科交叉融合支撑教材建设的途径，力争打造出精品教材，为创造有利于新能源卓越人才成长的环境、更好地培养高素质的新能源专业人才奠定更加坚实的基础。有鉴于此，新能源专业教材建设永远在路上！

丛书编委会

2018年1月

本书前言

中国可再生资源丰富,具有大规模开发的资源条件和技术潜力,可以为未来社会和经济提供足够的能源。随着产业的进步与发展,技术型人才的需求量也大幅增加。高等教育为配合国家战略新兴产业发展规划,顺应发展需求设立了新能源类相关专业。新能源类相关专业涉及的学科领域广泛,应用性强,对实践教学提出了更高的要求。

本书的编写主要针对光伏发电实践教学,将与光伏发电相关的材料物理、电工电子、电力系统、控制科学等相关学科集合在一起,以光伏发电视角整理相关学科知识。太阳能光伏发电涵盖学科内容较多,在大学本科教育阶段无法完成全方位的专业教学。本书以“工程思维”为主线,将与太阳能光伏发电工程相关的专业知识进行系统整合,从工程实践角度出发来呈现相关学科知识体系。

作为实验实训教程,本书可配合“太阳能转换原理与技术”“太阳电池”“光伏发电系统”“光伏并网发电及其逆变控制”“光伏检测技术与国际标准”与“智能微电网”等相关理论课,为以上课程提供课程实验及相关课程设计。通过本书的工程思维训练,学生可对光伏发电工程有更加清晰的理解,明确新能源类相关专业中基础学科在太阳能光伏发电行业中的应用模式,对行业知识有更清晰的理解。

本书包括太阳电池材料、太阳电池、光伏组件、光伏电力电子、储能电池、光伏发电系统和智能微电网7个模块,在使用本书前学生应具有与章节内容相对应的基础知识,特别是与电工电子、电力系统和控制科学相关的基础知识。本书内容以课程实验为主,其中在太阳电池实验、光伏组件实验、光伏电力电子实验和智能微电网实验4章中介绍部分相关基础知识,此类知识是对现有理论教材的内容补充,方便学生更加快速地掌握本书的知识结构体系和工程思维训练。

结合理论课程设计与光伏发电工程思维训练要求,本书共设置了44个实验,其中11个实验可作为课程设计引导内容(加*的章节),共可完成117个实验课时。基于新能源类相关专业学科体系与课程设置,本书主要适用于本科阶段三年级第6学期及四年级第7学期的专业主干课程。任课教师也可根据具体课程设置节选部分实验内容。

为提高学习效果,本书在每个实验后设有实验报告,学生可直接填写和分析实验数据,撰写实验报告。部分实验后附有思考题,任课教师可根据课程情况灵活安排。

本书由李涛主编,梁文英、梁光胜、司杨任副主编。袁娇、马先果、唐安江、李邦兴、吴江、刘文富、王银玲、宋经纬、王康民、武仁兵、刘剑参加了本书的编写工作。全书由李涛统稿。

本书是在“全国高等院校新能源专业规划教材”编委会直接领导下编写的,福建师范大学黄志高教授给与了重要的指导意见,南京日托光伏科技股份有限公司逯好峰博士为本

书提供了大量资料，在此一并表示感谢。中国水利水电出版社能源分社李莉、王春学、汤何美子为本书的编写做了大量工作，为提高本书的质量做出了重要贡献。在此，对他们表示衷心的感谢。全书在编写过程中，参阅了大量的参考书籍，将其中比较成熟的内容加以引用，并作为参考文献列于本书之后，以便读者查阅，同时对参考书籍的原作者表示衷心的感谢。

由于目前光伏发电技术发展迅速，而作者的专业水平有限，加之时间仓促，书中难免存在不妥、疏忽或错误之处，敬请专家和读者批评指正。

编者

2018年3月

目 录

丛书前言

本书前言

第 1 章 太阳能电池材料实验	1
1.1 单晶硅电阻率的测量	1
1.2 非平衡少数载流子寿命测试	9
1.3 单晶硅中旋涡缺陷的检测*	17
1.4 红外吸收法测定单晶硅中的碳含量	23
1.5 红外吸收法测定单晶硅中的氧含量	27
第 2 章 太阳能电池实验	31
2.1 太阳能电池的基本特性	31
2.2 太阳能电池伏安特性曲线绘制实验	35
2.3 环境因素对太阳能电池特性的影响*	47
2.4 太阳能电池串并联特性实验	61
2.5 太阳能电池的光谱响应测试*	67
第 3 章 光伏组件实验	75
3.1 光伏组件测试的发展历程	75
3.2 光伏组件基本性能测试的标准要求	75
3.3 光伏组件的环境性能测试	76
3.4 光伏组件的机械性能测试	78
3.5 光伏组件的热斑耐久性测试*	81
第 4 章 光伏电力电子实验	85
4.1 光伏发电控制器的工作原理与功能	85
4.2 光伏控制器相关实验*	86
4.2.1 光伏控制器 BUCK 电路驱动测试实验	86
4.2.2 光伏控制器 BUCK 电路测试实验	93
4.2.3 光伏控制器 BUCK 电路元件参数实验	99
4.2.4 光伏发电控制器最大功率点跟踪实验	105
4.2.5 三段式充电观察实验	109
4.3 光伏离网逆变器的工作原理与功能	110

4.4 光伏离网逆变器相关实验*	111
4.4.1 离网/并网逆变器结构认识实验	111
4.4.2 逆变器 TL494 推挽升压、调压实验	112
4.4.3 方波、修正波驱动波形编译并观察实验	114
4.4.4 全桥驱动实验	117
4.4.5 正弦波逆变器与变频实验	118
4.4.6 离网逆变器的创新实验	119
4.5 光伏并网逆变器相关实验	120
4.5.1 并网逆变器转换效率测试实验	120
4.5.2 并网逆变器实训实验	139
4.5.3 光伏并网逆变器直流输入电压范围测试实验	143
4.5.4 光伏并网逆变器电网频率响应测试实验	147
4.5.5 光伏并网逆变器最大功率点跟踪 (MPPT) 测试实验	151
4.5.6 光伏并网逆变器孤岛保护测试实验	155
第5章 储能电池实验	163
5.1 动力电池组充电及充电保护实验	163
5.2 动力电池组放电及放电保护实验	169
5.3 动力电池组均衡实验	175
5.4 动力电池组温度保护实验	176
第6章 光伏发电系统实验	178
6.1 气象信息采集实验*	178
6.2 光伏并网发电系统设计实验*	185
第7章 智能微电网实验	186
7.1 智能微电网的基础结构	186
7.2 微电网模拟光伏并网实验	190
7.3 双向储能变流器并网及充、放电实验	195
7.4 微电网系统并网实验	203
7.5 微电网离网运行实验	209
7.6 非计划性孤岛转换实验*	215
7.7 微电网孤岛并网切换实验*	219
7.8 微电网能量环流实验*	223
参考文献	227

第 1 章 太阳电池材料实验

1.1 单晶硅电阻率的测量

- 1. 实验目的
- 掌握四探针测试仪的使用。
- 掌握四探针法测量单晶硅电阻率的测试方法。
- 掌握单晶硅电阻率的数据评价方法。

2. 实验原理

四探针测试仪主机由主机板、前面板、后背板及机箱组成。前面板上主要装有数字表、测试电流换挡开关、电阻率/方块电阻转换开关、校准/测量变换开关以及电流调节电位器；后背板上装有电源插座、电源开关、保险管及四探针连接插座。机箱底板上装有主机板。前、后面板与主机板之间的连接均采用接插件，便于拆卸维修。其实验原理图如图 1.1 所示，电阻率测试仪框图如图 1.2 所示，测量仪器前面板如图 1.3 所示，测量仪器后面板如图 1.4 所示。

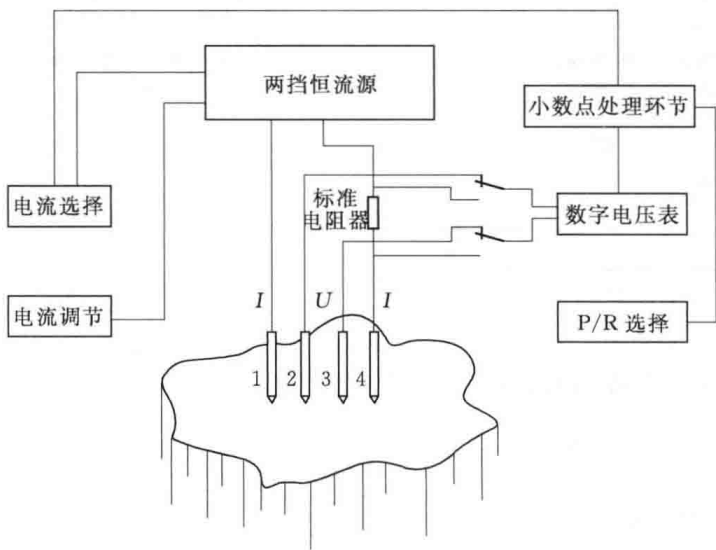


图 1.1 电阻率/方块电阻测试仪原理图

四探针测试仪的基本原理是恒流源给探针 1、探针 4 提供稳定的测量电流 I ，由探针 2、探针 3 测取被测样品上的电位差 U 。

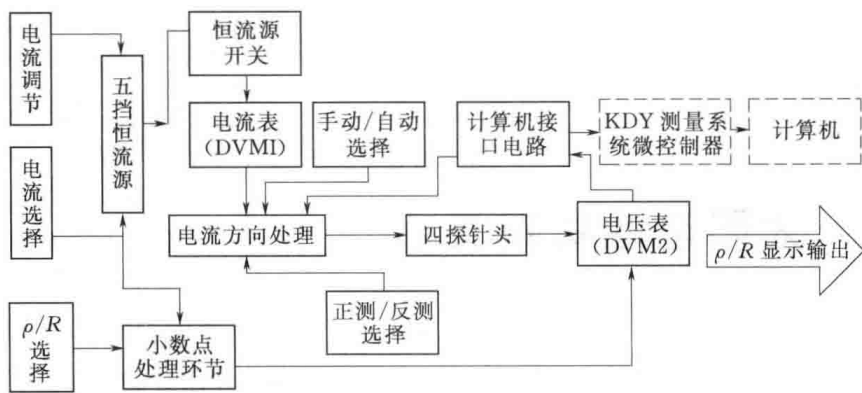


图 1.2 电阻率测试仪框图

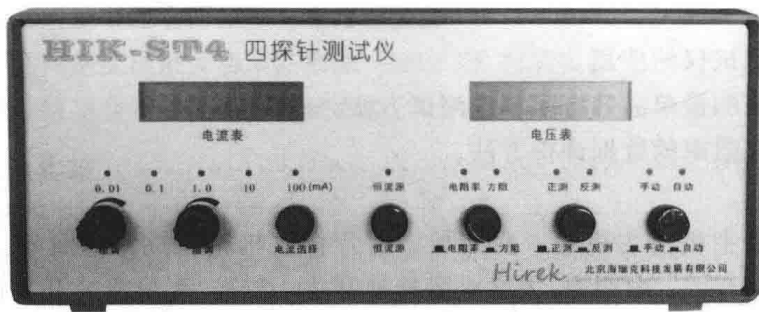


图 1.3 测量仪器前面板图

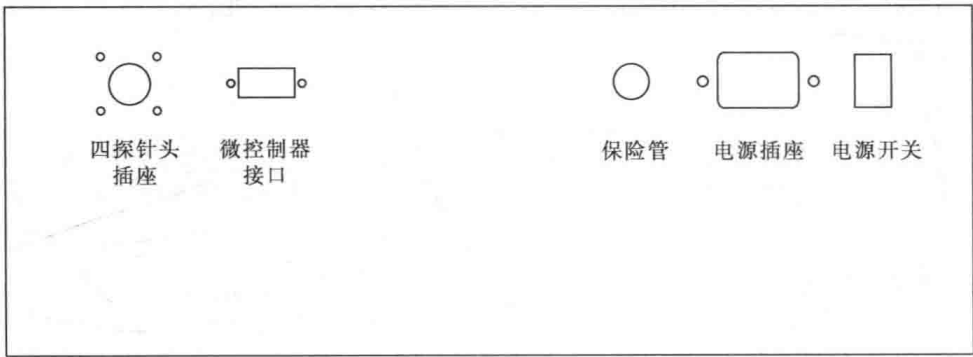


图 1.4 测量仪器后面板图

当样块厚度大于 4 倍探针间距时，即可计算材料的电阻率为

$$\rho=2\pi S \frac{U}{I} F_{\text{sp}}$$

(1.1)

式中 S ——探针间距，cm；
 U ——电压的读数，mV；
 I ——电流的读数，mA；
 F_{sp} ——探针间距修正系数；
 ρ ——电阻率， $\Omega \cdot \text{cm}$ 。



式 (1.1) 较为经典, 用于样品厚度和任一探针离样品边界的距离均大于 4 倍探针间距 (近似半无穷大的边界条件), 且无需进行厚度、直径修正的情况。此时如用 $S=1\text{mm}$ 的探头, 选择 $I=0.628\text{A}$; 如用 $S=1.59\text{mm}$ 的探头, 选择 $I=0.999\text{A}$, 这样就可以从本仪器的电压表上直接读出电阻率。

如选择 $I=2\pi S$, 只要处理好小数点的位置, 数字电压表上显示的 $U=\rho$ 。当 $F_{\text{sp}}=1.00$ 时, 如: $S=1\text{mm}$ 时, 可选择 $I=62.8\text{mA}$ 或 $I=6.28\text{mA}$; $S=1.59\text{mm}$ 时, 可选 $I=100.0\text{mA}$ 或 $I=10.00\text{mA}$ 。

样块厚度小于 4 倍探针间距的样片电阻率为

$$\rho=\frac{U}{I}F_{(W/S)}F_{(S/D)}F_{\text{sp}}F_{\text{t}}$$

(1.2)

- 式中
- U ——电压的读数, mV;

I ——电流的读数, mA;

W ——被测样片的厚度值, cm;

$F_{(W/S)}$ ——厚度修正系数, 数值见表 1.1;

$F_{(S/D)}$ ——直径修正系数, 数值见表 1.2;

F_{sp} ——探针间距修正系数;

F_{t} ——温度修正系数, 数值见表 1.3。

表 1.1 厚度修正系数 $F_{(W/S)}$ 计算表

W/S	$F_{(W/S)}$	W/S	$F_{(W/S)}$	W/S	$F_{(W/S)}$	W/S	$F_{(W/S)}$
0.40	0.9993	0.60	0.9920	0.80	0.9664	1.0	0.921
0.41	0.9992	0.61	0.9912	0.81	0.9645	1.2	0.864
0.42	0.9990	0.62	0.9903	0.82	0.9627	1.4	0.803
0.43	0.9989	0.63	0.9894	0.83	0.9608	1.6	0.742
0.44	0.9987	0.64	0.9885	0.84	0.9588	1.8	0.685
0.45	0.9986	0.65	0.9875	0.85	0.9566	2.0	0.634
0.46	0.9984	0.66	0.9865	0.86	0.9547	2.2	0.587
0.47	0.9981	0.67	0.9853	0.87	0.9526	2.4	0.546
0.48	0.9978	0.68	0.9842	0.88	0.9505	2.6	0.510
0.49	0.9976	0.69	0.9830	0.89	0.9483	2.8	0.477
0.50	0.9975	0.70	0.9818	0.90	0.9460	3.0	0.448
0.51	0.9971	0.71	0.9804	0.91	0.9438	3.2	0.422
0.52	0.9967	0.72	0.9791	0.92	0.9414	3.4	0.399
0.53	0.9962	0.73	0.9777	0.93	0.9391	3.6	0.378
0.54	0.9958	0.74	0.9762	0.94	0.9367	3.8	0.359
0.55	0.9953	0.75	0.9747	0.95	0.9343	4.0	0.342
0.56	0.9947	0.76	0.9731	0.96	0.9318		
0.57	0.9941	0.77	0.9715	0.97	0.9293		
0.58	0.9934	0.78	0.9699	0.98	0.9263		
0.59	0.9927	0.79	0.9681	0.99	0.9242		

注 厚度修正系数 $F_{(W/S)}$ 为圆片厚度 W 与探针间距 S 之比的函数。



表 1.2 直径修正系数 $F_{(S/D)}$ 计算表

S/D	$F(S/D)$	S/D	$F(S/D)$
0	4.532	0.055	4.417
0.005	4.531	0.060	4.395
0.010	4.528	0.065	4.372
0.015	4.524	0.070	4.348
0.020	4.517	0.075	4.322
0.025	4.508	0.080	4.294
0.030	4.497	0.085	4.265
0.035	4.485	0.090	4.235
0.040	4.470	0.095	4.204
0.045	4.454	0.100	4.171
0.050	4.436		

注 直径修正系数 $F_{(S/D)}$ 为探针间距 S 与圆片直径 D 之比的函数。

表 1.3 温度修正系数表

温度 $F_T/^\circ\text{C}$	标称电阻率/ $(\Omega \cdot \text{cm})$									
	0.005	0.01	0.1	1	5	10	25	75	180	250/500/1000
10	0.9768	0.9969	0.9550	0.9097	0.9010	0.9010	0.9020	0.9012	0.9006	0.8921
12	0.9803	0.9970	0.9617	0.9232	0.9157	0.9140	0.9138	0.9138	0.9140	0.9087
14	0.9838	0.9972	0.9680	0.9370	0.9302	0.9290	0.9275	0.9275	0.9278	0.9253
16	0.9873	0.9975	0.9747	0.9502	0.9450	0.9440	0.9422	0.9425	0.9428	0.9419
18	0.9908	0.9984	0.9815	0.9635	0.9600	0.9596	0.9582	0.9580	0.9582	0.9585
20	0.9943	0.9986	0.9890	0.9785	0.9760	0.9758	0.9748	0.9750	0.9750	0.9751
22	0.9982	0.9999	0.9962	0.9927	0.9920	0.9920	0.9915	0.9920	0.9922	0.9919
23	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
24	1.0016	1.0003	1.0037	1.0075	1.0080	1.0080	1.0078	1.0080	1.0082	1.0083
26	1.0045	1.0009	1.0107	1.0222	1.0240	1.0248	1.0248	1.0251	1.0252	1.0249
28	1.0086	1.0016	1.0187	1.0365	1.0400	1.0410	1.0440	1.0428	1.0414	1.0415
30	1.0121	1.0028	1.0252	1.0524	1.0570	1.0606	1.0600	1.0610	1.0612	1.0581

注 温度修正系数表的数据来源于中国计量科学研究院。

为方便用户直接从数字表上读出硅片电阻率，可设定 $I=WF_{(W/S)}F_{(S/D)}$ ，则 $\rho=UF_{\text{sp}}F_t$ ，这样就可预先计算出不同厚度样快的 I ，本仪器说明书附有硅片厚度直读电流选择表，只要按照样品厚度选择电流，即可从数字表上直接读出硅片电阻率。

3. 实验设备

四探针测定仪、标准样片。

4. 实验步骤

(1) 面板各参数选择。仪器除电源开关在后面板外其他控制部分均安装在前面板上，



前面板的左边集中了所有与电流测量有关的显示和控制部分,“电流表”显示各挡电流值,“电流选择”按钮供电流选用,220V 交流电电源接通后仪器自动选择在常用的 1.0mA 挡,此时“1.0”上方的红色指示灯亮,随着选择开关的按动,指示灯在不同的挡位亮起,直至选到合适挡位为止。打开“恒流源”按钮,上方指示灯亮,电流表显示电流值,调节“粗调”旋钮使前三位数达到目标值,再调节“细调”旋钮使后两位数达到目标值,这样就完成了电流调节工作。面板的右边集中了所有与电压测量有关的控制部件,“电压表”显示各挡(电阻率/方阻手动/自动)的正向、反向电压测量值。“电阻率/方阻”键必须选择正确,否则测量值会相差 10 倍;同样“手动/自动”挡也必须选择正确,否则仪器将拒绝工作。

后面板上主要安装电缆插座,安装时请注意插头与插座的对位标志。因为在背后容易漏插,松动时不易被发现,所以安装必须插全、插牢。

(2) 使用仪器前将电源线、测试架连接线、主机与微控制器的连接线连接好,并注意测试架上是否已接好探针头。电源线接入 220V 交流电后,开启后背板上的电源开关,此时前面板上的数字表、发光二极管都会亮起来。探针头压在被测单晶上,打开“恒流源”开关,“电流表”显示从探针 1、探针 4 流入单晶的测量电流,“电压表”显示电阻率(测单晶锭时)或探针 2 与探针 3 间的电位差。电流大小通过旋转前面板左下方的“粗调”“细调”旋钮加以调节,其他“正测/反测”开关,“电阻率/方阻”选择,“自动/手动”测量都通过前面板上可自锁的按钮开关控制。

(3) 仪器测量电流分五挡,即 0.01mA (10 μ A)、0.1mA (100 μ A)、1mA、10mA、100mA,读数方法如下:“电流表”显示 1.0000 时为本挡满挡电流,在 0.01mA 挡显示 1.0000,表示电流为 0.01mA $\times$ 1.0000=0.01mA;在 0.01mA 挡显示 0.6282,表示电流为 0.01mA $\times$ 0.6282=0.006282mA。

(4) 根据计算公式手动进行精确计算时,仪器“电压表”读数方法为:如“电压表”显示 01000 (忽略小数点),则电压读数为 10.00mV,即当选择不同挡位进行测量时,不论小数点移动到哪里,读取电压值时小数点相当于固定在 000.00 处。

根据《硅、锗单晶电阻率测定直排四探针法》(GB/T 1552—1995),不同电阻率硅试样所需要的电流值见表 1.4。

表 1.4 不同电阻率硅试样所需电流值

电阻率/($\Omega \cdot \text{cm}$)	电流/mA	推荐的硅片测量电流值
<0.03	≤ 100	100
0.03~0.3	< 100	25
0.3~3	≤ 10	2.5
3~30	≤ 1	0.25
30~300	≤ 0.1	0.025
300~3000	≤ 0.01	0.0025

根据《用单型程序直列式四点探针法测定硅外延层、扩散层、多晶硅层和离子注入层的薄膜电阻的标准试验方法》(ASTM F374—2002)测量方块电阻所需要的电流值见



表 1.5。

表 1.5		标准方法测量方块电阻所需电流值	
方块电阻/ Ω	电流/ mA	方块电阻/ Ω	电流/ mA
2.0~25	10	200~2500	0.1
20~250	1	2000~25000	0.01

(5) “恒流源”开关是在发现探针带电压接触被测材料影响测量数据（或材料性能）时使用的，即先让探针头压触在被测材料上，然后开“恒流源”开关，避免接触瞬间打火。为了提高工作效率，如探针带电压接触单晶，并对材料及测量并无影响时，“恒流源”开关可一直处于开的状态。

(6) “正测/反测”开关只有在手动状态下才能人工操作，在自动状态下连接其他测量系统时使用，因此在手动状态下“正测/反测”开关不起作用时，先检查“手动/自动”开关是否处于“手动”状态。相反在使用数据处理器测量材料电阻率时，仪器必须处于“自动”状态，否则其他测量系统无法正常工作。

(7) 在使用其他测量系统时，必须严格按照使用说明操作，应特别注意输入数据的单位。

5. 注意事项

- (1) 在使用标准样品进行校准时，不能直接用手取出标准样品，必须戴手套取样品。
- (2) 测量电阻率时，必须针对同一样品不同位置多次测试电阻率，最终结果取平均值。